



先进核电技术与核安全系列

“十二五”国家重点图书出版规划项目

核能与核技术出版工程

总主编 杨福家

辐射技术 与先进材料

Radiation Technology for
Advanced Materials

吴国忠 等 编著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



先 进 核 电 技 术 与 核 安 全 系 列

“十二五”国家重点图书出版规划项目

核能与核技术出版工程

总主编 杨福家

辐射技术与先进材料

Radiation Technology for
Advanced Materials

吴国忠 等 编著



上海交通大学出版社

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书为“十二五”国家重点图书出版规划项目“核能与核技术出版工程”之一。本书主要介绍一些已经成熟的辐射加工技术,如热收缩材料和电线电缆材料的制备技术,其中重点介绍利用辐射技术制造的先进材料及其优点,并通过一些实际案例来增加可读性;介绍若干正处于研究之中,并期待着未来能够实现技术突破和商业应用的材料。本书涉及的材料领域包括高性能纤维、自润滑特种材料、超细粉体特种材料、民用纤维、天然高分子材料、电池隔膜材料、特殊过滤材料及纳米材料等。

本书可作为高校与科研院所本科生培养与研究生教学资料,也可以用作科研人员和工程技术人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

辐射技术与先进材料 / 吴国忠等编著. — 上海 :

上海交通大学出版社, 2016

核能与核技术出版工程

ISBN 978-7-313-14197-2

I. ①辐… II. ①吴… III. ①辐射②辐射聚合—高分子材料 IV. ①04②TB324

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 298724 号

辐射技术与先进材料

编 著: 吴国忠 等

出版发行: 上海交通大学出版社

邮政编码: 200030

出 版 人: 韩建民

印 制: 山东鸿君杰文化发展有限公司

开 本: 710 mm×1000 mm 1/16

字 数: 365 千字

版 次: 2016 年 3 月第 1 版

书 号: ISBN 978-7-313-14197-2/O

定 价: 118.00 元

地 址: 上海市番禺路 951 号

电 话: 021-64071208

经 销: 全国新华书店

印 张: 22

印 次: 2016 年 3 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 0533-8510898

丛书编委会

总主编

杨福家(复旦大学原校长,中国科学院院士)

编委(按姓氏笔画排序)

于俊崇(中国核动力研究设计院,中国工程院院士)

马余刚(中国科学院上海应用物理研究所,研究员)

马栩泉(清华大学核能技术设计研究院,教授)

王大中(清华大学原校长,中国科学院院士)

韦悦周(上海交通大学核科学与工程学院,教授)

申 森(上海核工程研究设计院,研究员级高工)

朱国英(复旦大学放射医学研究所,研究员)

华跃进(浙江大学农业与生物技术学院,教授)

许道礼(中国科学院上海应用物理研究所,研究员)

孙 扬(上海交通大学物理与天文系,教授)

苏著亭(中国原子能科学研究院,研究员级高工)

肖国青(中国科学院近代物理研究所所长,研究员)

吴国忠(中国科学院上海应用物理研究所,研究员)

沈文庆(中国科学院上海分院,中国科学院院士)

陆书玉(上海市环境科学学会副理事长,教授)

周邦新(上海大学材料研究所所长,中国工程院院士)

郑明光(上海核工程研究设计院院长,研究员级高工)

赵振堂(中国科学院上海应用物理研究所所长,研究员)

胡立生(上海交通大学电子信息与电气工程学院,教授)

胡思得(中国工程物理研究院,中国工程院院士)

徐步进(浙江大学农业与生物技术学院,教授)

徐洪杰(中国科学院上海应用物理研究所原所长,研究员)

黄 钢(上海健康医学院院长,教授)

曹学武(上海交通大学机械与动力工程学院,教授)

程 旭(上海交通大学核科学与工程学院,教授)

潘健生(上海交通大学材料科学与工程学院,中国工程院院士)

总 序

1896 年法国物理学家贝可勒尔对天然放射性现象的发现,标志着原子核物理学的开始,直接导致了居里夫妇镭的发现,为后来核科学的发展开辟了道路。1942 年人类历史上第一个核反应堆在芝加哥的建成被认为是原子核科学技术应用的开端,至今已经历了 70 多年的发展历程。核技术应用包括军用与民用两个方面,其中民用核技术又分为民用动力核技术(核电)与民用非动力核技术(即核技术在理、工、农、医方面的应用)。在核技术应用发展史上发生的两次核爆炸与三次重大核电站事故,成为人们长期挥之不去的阴影。然而全球能源匮乏以及生态环境恶化问题日益严峻,迫切需要开发新能源,调整能源结构。核能作为清洁、高效、安全的绿色能源,还具有储量最丰富、高能量密集度、低碳无污染等优点,受到了各国政府的极大重视。发展安全核能已成为当前各国解决能源不足和应对气候变化的重要战略。我国《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020)》明确指出“大力发展核能技术,形成核电系统技术的自主开发能力”,并设立国家科技重大专项“大型先进压水堆及高温气冷堆核电站专项”,把“钍基熔盐堆”核能系统列为国家首项科技先导项目,投资 25 亿元,已在中国科学院上海应用物理研究所启动,以创建具有自主知识产权的中国核电技术品牌。

从世界来看,核能应用范围正不断扩大。目前核能发电量美国排名第一,中国排名第六;不过核能发电的占比方面,法国占比约 74%,排名第一,中国仅约 2%,排名几乎最后。但是中国在建、拟建和提议的反应堆数比任何国家都多。相比而言,未来中国核电有很大的发展空间。2015 年为中国核电重启的关键年,据中国核能行业协会发布的最新数据显示,截至 2015 年 6 月底,中国投入商业运行的核电机组共 25 台,总装机容量为 2 334 万千瓦。值此核电发展的历史机遇期,中国应大力推广自主开发的第三代以及第四代的“快堆”、

“高温气冷堆”、“钍基熔盐堆”核电技术,努力使中国核电走出去,带动中国由核电大国向核电强国跨越。

随着先进核技术的应用发展,核能将成为逐步代替化石能源的重要能源。受控核聚变技术有望从实验室走向实用,为人类提供取之不尽的干净能源;威力巨大的核爆炸将为工程建设、改造环境和开发资源服务;核动力将在交通运输及星际航行等方面发挥更大的作用。核技术几乎在国民经济的所有领域得到应用。原子核结构的揭示,核能、核技术的开发利用,是 21 世纪人类征服自然的重大突破,具有划时代的意义。然而,日本大海啸导致的福岛核电站危机,使得发展安全级别更高的核能系统更加紧迫,核能技术与核安全成为先进核电技术产业化追求的核心目标,在国家核心利益中的地位愈加显著。

在 21 世纪的尖端科学中,核科学技术作为战略性高科技学科,已成为标志国家经济发展实力和国防力量的关键学科之一。通过学科间的交叉、融合,核科学技术已形成了多个分支学科并得到了广泛应用,诸如核物理与原子物理、核天体物理、核反应堆工程技术、加速器工程技术、辐射工艺与辐射加工、同步辐射技术、放射化学、放射性同位素及示踪技术、辐射生物等,以及核技术在农学、医学、环境、国防安全等领域的应用。随着核科学技术的稳步发展,我国已经形成了较为完整的核工业体系。核科学技术已走进各行各业,为人类造福。

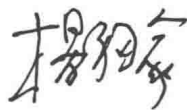
无论是科学研究方面,还是产业化进程方面,我国的核能与核技术研究与应用都积累了丰富的成果和宝贵经验,应该系统总结、整理一下。另外,在大力发展核电的新时期,也急需有一套系统而实用的、汇集前沿成果的技术丛书作指导。在此鼓舞下,上海交通大学出版社联合上海市核学会,召集了国内核领域的权威专家组成高水平编委会,经过多次策划、研讨,召开编委会商讨大纲、遴选书目,最终编写了这套“核能与核技术出版工程”丛书。本丛书的出版旨在:培养核科技人才;推动核科学研究和学科发展;为核技术应用提供决策参考和智力支持;为核科学研究与交流搭建一个学术平台,鼓励创新与科学精神的传承。

这套丛书的编委及作者都是活跃在核科学前沿领域的优秀学者,如核反应堆工程及核安全专家王大中院士、核武器专家胡思得院士、实验核物理专家沈文庆院士、核动力专家于俊崇院士、核材料专家周邦新院士、核电设备专家潘健生院士,还有“国家杰出青年”科学家、“973”项目首席科学家、“国家千人计划”特聘教授等一批有影响的科研工作者。他们都来自各大高校及研究单

位,如清华大学、复旦大学、上海交通大学、浙江大学、上海大学、中国科学院上海应用物理研究所、中国科学院近代物理研究所、中国原子能科学研究院、中国核动力研究设计院、中国工程物理研究院、上海核工程研究设计院、上海市辐射环境监督站等。本丛书是他们最新研究成果的荟萃,其中多项研究成果获国家级或省部级大奖,代表了国内甚至国际先进水平。丛书涵盖军用核技术、民用动力核技术、民用非动力核技术及其在理、工、农、医方面的应用。内容系统而全面且极具实用性与指导性,例如,《应用核物理》就阐述了当今国内外核物理研究与应用的全貌,有助于读者对核物理的应用领域及实验技术有全面的了解,其他书目也都力求做到了这一点,极具可读性。

由于本丛书良好的立意和高品质的学术成果,使得本丛书在策划之初就受到国家的重视,成功入选了“十二五”国家重点图书出版规划项目。另外,本丛书也受到上海新闻出版局的高度肯定,部分书目成功入选了“上海高校服务国家重大战略出版工程”。

在丛书出版的过程中,我们本着追求卓越的精神,力争把丛书从内容到形式上做到最好。希望这套丛书的出版能为我国大力发展核能技术提供上游的思想、理论、方法,能为核科技人才的培养与科创中心建设贡献一份力量,能成为不断汇集核能与核技术科研成果的平台,推动我国核科学事业不断向前发展。



2015 年 11 月

前 言

由于电离辐射可引发化学分子发生化学键断裂并进一步引发化学反应,通过巧妙利用该反应过程可以用于制造新材料,尤其是具有特殊性能的高分子材料。这一特殊的加工过程一般在常温下进行,操作方便。但是由于辐射设施(电子加速器和钴源)造价昂贵且需要特殊的环保审批流程,因此辐射加工通常用于制造高附加值的特殊材料。经过近 30 年的发展,我国的辐射加工产业已经形成了较大规模,尤其在电线电缆、热收缩材料、发泡材料、包装材料、橡胶硫化等领域已得到了广泛应用,显示了该技术的优势,使辐射加工在核技术领域占有重要地位,并在国民经济中发挥重要作用。在辐射加工设备方面,国内企业从早期模仿国外加速器开始,目前已能够生产不同能量的地纳米加速器、高能直线加速器以及低能自屏蔽加速器,为提高我国辐射加工产业的竞争力提供了充分保障。尽管许多常规材料的辐射加工技术已经被企业掌握,并实现规模化商业生产,然而这些技术大部分是依赖于常温下辐照即可实现的辐射交联技术。辐射技术的魅力在于可以通过一些特殊的工艺组合,制造具有特殊性能的材料,这是其他技术手段难以媲美的优势。

辐射技术具有很强的实用性,未来在先进材料制造领域将继续发挥重要作用,我们希望通过辐射技术用于先进材料制造的介绍,不仅为辐射加工和辐射化学领域的研究和技术人员提供参考,更希望为不同材料领域的技术或研发人员展示辐射技术的魅力,推动辐射技术在先进材料领域的应用,为我国先进材料的研发和制造提供新的思考。

本书主要由中国科学院上海应用物理研究所、北京大学、中国科学技术大学的老师编写,另外青岛怡维怡橡胶研究院有限公司的技术人员编写了橡胶辐射硫化的部分。我们希望通过“辐射技术在材料中的应用”这一主题出发,探讨辐射技术在哪些材料领域正在得到应用或者将来可能得到应用。撰写本书

的主要单位虽然为高校和研究所,但是他们都是国内长期从事辐射化学或辐射技术研究的单位,而且对辐射技术研究以及产业化具有较为丰富的经历。希望本书能够在学术界和产业界之间架起一座桥梁,共同关注辐射技术未来的发展,使更多的技术或先进材料能够真正产业化,服务于国民经济。

本书第1章前3节、第3章、第4章第1节与第2节由中国科学院上海应用物理研究所吴国忠研究员课题组撰写;第1章第4节由中国科学院上海应用物理研究所李景烨研究员和虞鸣副研究员撰写;第2章第1节由中国科学院上海应用物理研究所张聪副研究员撰写,第2节由青岛怡维怡橡胶研究院有限公司王玉海、张琳及张利华撰写,第3节由吴国忠研究员撰写;第5章由中国科学技术大学张志成教授撰写;第4章第3节、第6章、第7章第1节、第2节由北京大学翟茂林教授、彭静副教授撰写;第7章第3节及第4节由中国科学技术大学葛学武教授、汪谟贞副教授、刘华蓉副教授撰写。

在本书编写和出版过程中得到了众多的帮助与支持。上海市核学会许道礼秘书长的鼓励和热心推荐使我们终于有勇气撰写此书,上海交通大学出版社杨迎春老师的协助和催促使我们最终完成了书稿。在书稿编写过程中,得到了国内许多同行的鼓励与支持,衷心感谢北京大学、中国科学技术大学以及我的同事们给予的支持。他们收集了大量资料,同时也把自己常年积累的经验甚至技术诀窍都写在书稿中,使其具有很高的可读性和实用性。在书稿收集和编排过程中得到了中国科学院上海应用物理研究所许璐博士和李荣博士等的大力支持,在此一并致谢!

由于编者水平有限,书中存在的缺点和不足,敬请读者批评指正。另外,还有很多与辐射技术相关的先进材料未能在书中得到体现,希望今后有机会再版时进行补充和完善。

中英文缩略语对照表

中 文	英 文 全 称	英文缩写
2,5-二叔戊基氢醌	2,5 - di(tert-amyl)hydroquinone	DAH
X 射线光电子能谱	X-ray photoelectron spectroscopy	XPS
苯乙烯	styrene	St
丙烯腈	acrylonitrile	AN
丙烯酸	acrylic acid	AAc
丙烯酸异辛酯	isooctyl acrylate	OA
丙烯酰胺	acrylic amide	AAm
层间剪切强度	interlaminar shear strength	ILSS
差示扫描量热仪	differential scanning calorimeter	DSC
超高相对分子质量聚乙烯	ultra high molecular weight polyethylene	UHMWPE
超临界流体	supercritical fluid	SCF
超临界流体抗溶剂法	supercritical fluid anti-solvent	SAS
超临界流体溶液快速膨胀	rapid expansion of supercritical solution	RESS
超细全硫化粉末橡胶	ultrafine full-vulcanized powder rubber	UFPR
德国电工学会	Verband Deutscher Elektrotechniker	VDE
低密度聚乙烯	low density polyethylene	LDPE
电子束	electron beam	EB
电子自旋共振	electron spin resonance	ESR
丁苯橡胶	polymerized styrene butadiene rubber	SBR
丁基橡胶	isobutylene isoprene rubber	IIR

(续表)

中 文	英 文 全 称	英文缩写
对氨基苯乙胺	2-(4-aminophenyl)ethylamine	APA
多官能团不饱和单体	polyfunctional monomer	PFM
二丙烯酸-1,6-己二醇酯	1,6-hexanediol diacrylate	AHD
二甲亚砜	dimethyl sulphoxide	DMSO
二十二碳六烯酸	docosahexaenoic acid	DHA
二十碳五烯酸	eicosapentaenoic acid	EPA
二元乙丙橡胶	ethylene propylene methylene	EPM
高熔体强度聚丙烯	high melt strength polypropylene	HMSPP
国际电工委员会	International Electrotechnical Commission	IEC
过氧化二异丙苯	dicumyl peroxide	DCP
红外光	infrared	IR
甲基丙烯酸甲酯	methyl methacrylate	MMA
甲基丙烯酸缩水甘油酯	glycidyl methacrylate	GMA
聚氨酯	polyurethane	PU
聚苯乙烯	polystyrene	PS
聚苯乙烯甲基丙烯酸甲酯	poly(styrene-co-methyl methacrylate)	SMMA
聚丙烯	polypropylene	PP
聚丙烯发泡	expanded polypropylene	EPP
聚丙烯腈	polyacrylonitrile	PAN
聚醋酸乙酯/天然橡胶	polyvinyl acetate/natural rubber	PVAc/NR
聚对苯二甲酸乙二醇酯	polyethylene terephthalate	PET
聚砜	polysulfone	PSF
聚甲基丙烯酸甲酯	polymethylmethacrylate	PMMA
聚氯乙烯/丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物	polyvinyl chloride/acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer	PVC/ABS
聚氯乙烯/甲基丙烯酸甲酯-丁二烯-苯乙烯共聚物	polyvinyl chloride/methyl methacrylate-butadiene-styrene copolymer	PVC/MBS
聚偏氟乙烯	polyvinylidene fluoride	PVDF

(续表)

中 文	英 文 全 称	英文缩写
聚四氟乙烯	polytetrafluoroethylene	PTFE
聚碳硅烷	polycarbosilane	PCS
聚碳酸酯	polycarbonate	PC
聚乙烯	polyethylene	PE
冷却剂丧失事故/设计基准事件	loss of coolant accident/design basis event	LOCA/DBE
冷却剂丧失事故/主蒸汽管断裂事故	loss of coolant accident/main steamline break accident	LOCA/MSLB
氯丁橡胶	chloroprene rubber	CR
氯化丁基橡胶	chlorinated isobutylene isoprene rubber	CIIR
美国材料与试验协会	American Society for Testing and Materials	ASTM
偶氮二甲酰胺	azodicarbonamide	AC
全硫化超细粉末丁苯橡胶	ultrafine full-vulcanized styrene butadiene rubber powder	UFPSBR
全硫化热塑性弹性体	thermoplastic vulcanizate	TPV
热重分析	thermogravimetric analysis	TGA
日本原子力研究开发机构	Japan Atomic Energy Agency	JAEA
三羟甲基丙烷三甲基丙烯酸酯	trimethylolpropane trimethacrylate	TMPTMA
三烯丙基异氰脲酸酯	triallyl isocyanurate	TAIC
三元乙丙橡胶	ethylene propylene diene methylene	EPDM
扫描电子显微镜	scanning electron microscope	SEM
十六烷基三甲基溴化铵	cetyltrimethylammonium bromide	CTAB
顺丁胶	cis-polybutadiene rubber	BR
碳纤维增强复合材料	carbon fiber reinforced plastic	CFRP
天然橡胶	natural rubber	NR
天然橡胶胶乳	natural rubber latex	NRL
无转子硫化仪	moving die rheometer	MDR

(续表)

中 文	英 文 全 称	英文缩写
溴化丁基橡胶	brominated isobutylene isoprene rubber	BIIR
亚磷酸三壬基酚酯	tris(nonylphenyl) phosphite	TNPP
亚太地区辐射化学国际会议	Asia-Pacific Symposium on Radiation Chemistry	APSRC
亚乙基硫脲	ethylene thiourea	ETU
氧化石墨烯	graphene oxide	GO
乙丙橡胶	ethylene propylene rubber	EPR
乙烯-1-辛烯共聚物	polyolefin elastomer	POE
乙烯-醋酸乙烯酯共聚物	ethylene-vinyl acetate copolymer	EVA
乙烯-四氟乙烯共聚物	ethylene-tetra-fluoro-ethylene	ETFE, 俗称 F40
异戊二烯橡胶	polyisoprene rubber	IR
紫外光	ultraviolet	UV

目 录

绪论 辐射技术的现状与未来	001
1 辐射技术在高性能纤维及功能纺织品中的应用	009
1.1 辐射技术在碳纤维及碳化硅纤维中的应用	009
1.1.1 碳纤维	009
1.1.2 高性能 SiC 纤维	020
1.2 超高相对分子质量聚乙烯(UHMWPE)纤维的辐射改性	025
1.2.1 UHMWPE 纤维辐射效应	025
1.2.2 UHMWPE 纤维辐射接枝及应用	028
1.2.3 辐射改性 UHMWPE 纤维在海水提铀研究中的 应用	034
1.3 辐射表面改性在先进复合材料中的应用	040
1.3.1 高性能纤维及复合材料	040
1.3.2 芳纶纤维辐射改性	043
1.3.3 碳纤维辐射改性	044
1.3.4 UHMWPE 纤维辐射改性	046
1.4 辐射接枝制备功能纺织品	047
1.4.1 功能纺织品的种类与制备方法	047
1.4.2 应用辐射接枝技术制备功能纺织品的优点	050
1.4.3 辐射接枝法制备功能纺织品的研究现状	051
1.4.4 辐射接枝法制备功能纺织品的应用前景	056
参考文献	056

2	辐射交联及典型应用	063
2.1	交联电线电缆与热收缩材料	063
2.1.1	辐射交联电线电缆	063
2.1.2	辐射交联热收缩材料	067
2.2	橡胶轮胎的辐射硫化	071
2.2.1	橡胶的辐射硫化	071
2.2.2	辐射技术在轮胎中的应用	075
2.3	胶乳粒子辐射交联	083
2.3.1	辐射硫化	083
2.3.2	胶乳的纳米粒子填充	098
	参考文献	103
3	聚合物辐射交联发泡技术	105
3.1	聚合物微孔发泡材料	105
3.2	超临界流体发泡技术	107
3.2.1	超临界 CO ₂ 在萃取中的应用	109
3.2.2	超临界 CO ₂ 在聚合物材料加工中的应用	109
3.2.3	发泡机理	111
3.3	聚合物发泡材料研究进展	112
3.3.1	国内外研究现状	112
3.3.2	研究成果及应用	112
3.4	辐射交联发泡技术	117
3.4.1	辐射交联机理	118
3.4.2	辐射发泡交联	120
3.4.3	PP 辐射交联发泡材料	121
3.4.4	PP 发泡材料的应用	126
3.4.5	现有生产技术的分析	131
	参考文献	132
4	辐射裂解及应用	135
4.1	PTFE 辐射降解、交联与表面改性	135
4.1.1	PTFE 的结构与性能简介	135

4.1.2	PTFE 辐射降解与交联	136
4.1.3	PTFE 表面改性	143
4.2	聚合物超细粉体材料	151
4.2.1	PTFE 超细粉体材料简介	151
4.2.2	PTFE 超细粉体的国内外发展现状	152
4.2.3	PTFE 超细粉体材料的产业应用	153
4.2.4	其他超细粉体材料	154
4.3	聚多糖及其衍生物的辐射改性研究	158
4.3.1	聚多糖及其衍生物简介	158
4.3.2	聚多糖及其衍生物的辐射接枝共聚及其应用	167
4.3.3	聚多糖及其衍生物的辐射交联及其应用	177
	参考文献	184
5	辐射乳液聚合	189
5.1	乳液聚合	189
5.1.1	乳液聚合发展历程及其特点	189
5.1.2	乳液聚合基本理论	190
5.1.3	辐射乳液聚合	194
5.2	辐射乳液聚合的部分简介	195
5.2.1	醋酸乙烯(VAc)的辐射乳液聚合	195
5.2.2	辐射乳液聚合制备复合材料	195
5.2.3	辐射乳液共聚合	196
5.2.4	辐射无皂乳液聚合	197
5.2.5	辐射乳液聚合法其他进展	197
5.3	涂料印花黏合剂的辐射法制备	199
5.3.1	制备黏合剂的代表性基本配方	199
5.3.2	工艺过程	199
5.4	丙烯酸盐类增稠剂的辐射法制备	201
5.5	辐射乳液聚合技术的优缺点	202
	参考文献	203

6	离子液体的辐射效应	205
6.1	离子液体及其萃取体系简介	205
6.1.1	离子液体简介	205
6.1.2	用于乏燃料后处理的常用萃取剂	206
6.2	纯咪唑离子液体 γ 辐射效应研究	209
6.2.1	辐照对咪唑离子液体物理性质的影响	209
6.2.2	咪唑离子液体辐致变色与其脱色的研究	210
6.2.3	咪唑离子液体辐解产物的分离与鉴定	213
6.3	纯咪唑离子液体 α 辐射效应研究	215
6.3.1	He^+ 束辐照对咪唑离子液体光谱性质的影响	215
6.3.2	咪唑离子液体在 He^+ 束辐照下辐解产物的鉴定	217
6.4	咪唑离子液体/冠醚萃取体系的 γ 辐射效应研究	218
6.4.1	辐照对萃取体系中萃取剂浓度的影响	218
6.4.2	咪唑离子液体萃取体系辐解产物的鉴定	220
6.5	辐照对咪唑离子液体萃取体系萃取性能的影响	221
6.5.1	γ 射线辐照对咪唑离子液体体系萃取性能的影响	221
6.5.2	He^+ 束辐照对咪唑离子液体体系萃取性能的影响	223
6.6	咪唑聚离子液体凝胶的辐射合成及其吸附分离性能	225
6.6.1	聚离子液体简介	225
6.6.2	咪唑聚离子液体凝胶的辐射合成及其吸附分离性能	226
6.7	展望	228
	参考文献	229
7	辐射技术在新材料中的应用	233
7.1	离子交换膜的辐射合成及应用	233
7.1.1	离子交换膜简介及辐射接枝聚合	233
7.1.2	辐射接枝法制备离子交换膜	240
7.1.3	辐射合成离子交换膜的应用	247
7.2	辐射法制备石墨烯	260
7.2.1	石墨烯简介	260
7.2.2	石墨烯的辐射还原制备及应用	264